

І. В. Воєвідко, д-р техн. наук; **В. В. Токарук**, канд. техн. наук

*Івано-Франківський Національний Технічний Університет Нафти і Газу,
м. Івано-Франківськ, Україна; e-mail: vasyk.tokaruk@gmail.com*

ПРОЕКТУВАННЯ КОМПОНОВОК НИЗУ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ З ДВОМА ПОРОДОРУЙНУЮЧИМИ ІНСТРУМЕНТАМИ З НАДТВЕРДИМ ОЗБРОЄННЯМ

Розроблена методика розрахунку компоновок низу бурильної колони (КНБК) з двома породоруйнівними інструментами, оснащеними твердосплавними різцями для буріння свердловин великого діаметра з можливістю керування траєкторією.

Розроблено математичну модель розрахунку компоновок для буріння свердловин великого діаметра з використанням двох породоруйнівних інструментів – долота і розширювача. Змодельовані основні технічні і геологічні фактори, що мають вплив на елементи компоновки (напружено-деформований стан КНБК, відхиляючі сили, які виникають через вплив породи). Створено алгоритм для визначення розподілу осьового навантаження між долотом і розширювачем. Змодельовано формування ексцентричного зміщення розширювача відносно пілотного стовбура та зміну інтенсивності викривлення стовбура у процесі поглиблення.

Наведені основні етапи розрахунку, проведено практичний розрахунок згідно з розробленою методикою, результатом якого є поінтервальне визначення наступних параметрів – осьового навантаження на долоті і розширювачі, відхиляючих сил на породоруйнівних інструментах, ексцентричного зміщення розширювача, інтенсивності викривлення стовбура свердловини.

Наукова новизна запропонованого в роботі методу – комплексний підхід до розрахунку компоновок з двома породоруйнівними інструментами, що дозволяє проводити ітераційний циклічний розрахунок з постійним уточненням основних параметрів і створенням масиву даних для побудови траєкторії свердловини.

Розроблена методика розрахунку компоновок низу бурильної колони з двома породоруйнівними інструментами дозволяє визначити раціональну конструкцію КНБК для буріння свердловини в заданому напрямку за рахунок зміни конструктивних параметрів ОБТ, опорноцентрувальних елементів, долота, розширювача і обмежувача ексцентриситету.

Ключові слова: *свердловина великого діаметра, два породоруйнівні інструменти, розширювач, буріння в заданому напрямку, пілотний стовбур, ексцентриситет.*

В процесі буріння свердловини з використанням одночасно двох породоруйнівних інструментів значення зенітного кута і ексцентриситету постійно змінюються. Тому роботу ступінчастої КНБК неможливо повністю охарактеризувати за допомогою одноциклового методу розрахунку. Раціональним є проведення циклічного розрахунку основних параметрів з уточненням в кінці інтервалу їхніх значень і подальшим використанням уточнених величин під час початкового розрахунку наступної ділянки.

За розробленою авторами методикою, цикл розрахунку КНБК (на певному інтервалі) поділяється на чотири етапи:

1. Розраховується розподіл осьового навантаження між долотом і розширювачем.

2. Проводиться розрахунок напружено-деформованого стану компоновки низу бурильної колони з двома породоруйнівними інструментами, розраховуються відхиляючі сили на породоруйнівних інструментах, утворені геологічними факторами, визначаються результуючі відхиляючі сили на долоті і розширювачі.

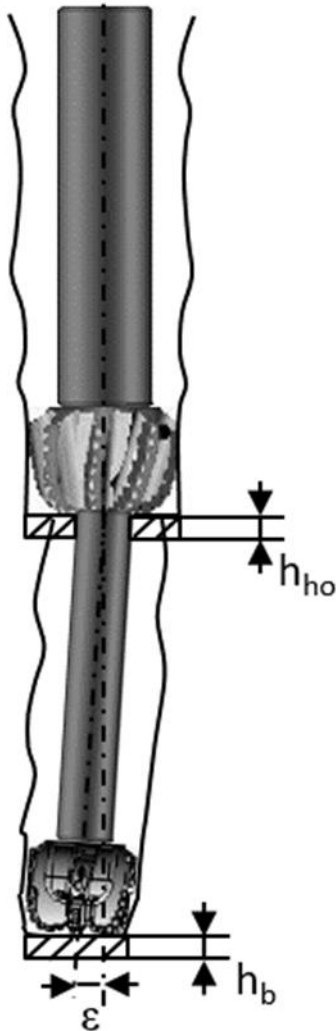


Схема компоновки з двома породоруйнівними інструментами

Навантаження на долото визначаємо за формулою:

$$P_b = \frac{P}{1 + n_r \cdot k_d \cdot a_i \cdot k_f \cdot k_\sigma}, \quad (1)$$

де: P – загальне осьове навантаження; n_r – показник ресурсу озброєння породоруйнівних інструментів; k_d – коефіцієнт динаміки роботи породоруйнівних інструментів; a_i – коефіцієнт кінематики породоруйнівних інструментів; k_f – коефіцієнт площ руйнування ступені і вибою, k_σ – співвідношення твердості гірської породи під долотом і розширювачем.

У свою чергу:

$$n_r = \frac{z_{tb}}{z_{tho}},$$

де z_{tb} , z_{tho} – кількість різців відповідно долота і розширювача;

3. Розраховується ексцентриситет на розширювачі і долоті.

4. Визначається інтенсивність викривлення свердловини.

На першому етапі розраховується розподіл осьового навантаження між долотом і розширювачем. Під час прогнозування розподілу осьового навантаження були прийняті деякі основоположні результати дослідження процесу руйнування гірських порід [1, 2]:

- відбувається об'ємне руйнування породи при хорошому очищенні вибою;
- озброєння долота і розширювача однотипне;
- об'єм породи зони руйнування прямопропорційний навантаженню на зубок.

Теоретичні дослідження проводились з використанням детермінованого методу прогнозування орієнтованих значень механічної швидкості буріння PDC долотами.

На рисунку наведено схему компоновки з двома породоруйнівними інструментами. За певну кількість обертів породоруйнівні елементи руйнують різний об'єм породи. Якщо на початку буріння руйнівна здатність долота і розширювача різні, то з часом автоматично відбувається перерозподіл осьового навантаження між ними до тих пір, поки вони не почнуть працювати синхронно, тобто поглиблення долота h_b і розширювача h_{ho} будуть рівними.

Теоретичні дослідження проводились з використанням детермінованого методу прогнозування орієнтованих значень механічної швидкості буріння PDC долотами.

$$k_f = \frac{F_{ho}}{F_b},$$

де F_{ho} , F_b – площа руйнування породи долотом і розширювачем.

$$k_d = \frac{k_{db}}{k_{dho}},$$

де k_{db} , k_{dho} – коефіцієнти динамічності прикладених навантажень (залежить від умов абразивного зносу і нагріву породоруйнівних елементів).

$$k_\sigma = \frac{\sigma_{rho}}{\sigma_{rb}},$$

де σ_{rho} , σ_{rb} – твердість гірської породи під розширювачем і долотом відповідно.

Проаналізувавши рівняння (1), можна зробити висновок, що значний вплив на розподіл осевого навантаження між долотом і розширювачем мають конструктивні особливості цих породоруйнівних інструментів, тобто кількість різців, що, власне, і враховується в показнику ресурсу озброєння.

На другому етапі на основі розв'язання диференціальних рівнянь вигнутої осі компоновки проводиться розрахунок напружено-деформованого стану КНБК з двома породоруйнівними інструментами і визначаються технічні відхиляючі сили на контактних елементах [3].

Також розраховуються геологічні складові відхиляючих сил на породоруйнівних інструментах з урахуванням твердості породи, бурового індексу анізотропії та кута падіння пластів [4]:

$$F_{g.l.b} = 0.5 \cdot \sigma_r \cdot S_b \cdot h_b \cdot \sin 2(\gamma - \alpha);$$

$$F_{g.l.ho} = 0.5 \cdot \sigma_r \cdot S_{ho} \cdot h_b \cdot \sin 2(\gamma - \alpha),$$

де σ_r – твердість породи по штампу; S_b, S_{ho} – площа контактної поверхні відповідно долота і розширювача з вибоєм; h_b – буровий індекс анізотропії гірської породи; γ – кут падіння породи; α – zenітний кут нахилу свердловини.

Результуючі відхиляючі сили на долоті і розширювачі визначаються за різницею технічної і геологічної складових, що діють на відповідний елемент:

$$F_{r.l.b} = F_{g.l.b} - F_{t.l.b}$$

$$F_{r.l.ho} = F_{g.l.ho} - F_{t.l.ho}' \quad (2)$$

де $F_{t.l.b}$, $F_{t.l.ho}$ – технічні складові відхиляючої сили на долоті і розширювачі.

На третьому етапі розраховується ексцентриситет на розширювачі шляхом визначення бокових зміщень на породоруйнівних інструментах з урахуванням даних, отриманих за допомогою формул (2) [5, 6]:

$$h = \frac{V}{S} = \frac{0,5 \cdot L_{pt} \cdot n_{tp} \cdot F_{r.l.} \cdot K_p \cdot n}{R \cdot h_{sh}},$$

де L_{pt} – довжина траєкторії руху різця; n_{tp} – кількість різців на боковій поверхні породоруйнівного інструмента; $F_{r.l.}$ – результуюча відхиляюча сила; K_p – кутовий коефіцієнт, обернено пропорційний твердості породи по штампу; n – кількість обертів породоруйнівного інструмента; R – радіус породоруйнівного інструмента; h_{sh} – висота опорної поверхні.

Величина ексцентриситету визначається за формулою:

$$\varepsilon = h_{ho} - h_b,$$

де h_b, h_{ho} – відповідно бокове зміщення на долоті і розширювачі.

На четвертому етапі визначається інтенсивність викривлення свердловини та її напрямок [7,8]:

$$\frac{d\alpha}{dS} = \frac{2}{L} \Phi_\alpha = \frac{2}{L} \left(\beta_0 + k \frac{F_{t.l.}}{P} \cos \rho + \frac{h}{2} \sin 2\omega \cos \sigma \right),$$

де L – довжина спрямовуючої ділянки від долота до першої точки контакту КНБК з стінкою свердловини; $\beta_0 = \frac{D_b - D_c}{2 \cdot L}$ – кут неспіввісності; D_b, D_c – діаметр долота і опорно-центрувального

елемента відповідно (або розширювача); k – коефіцієнт фрезеруючої здатності долота; $F_{t.l.}, P$ – відповідно відхиляюча сила і осьове навантаження на долото; h – буровий індекс анізотропії;

$\omega = \arcsin \left\{ \frac{\cos[\alpha - \arctg(\operatorname{tg} \gamma \cos \varphi_n)] \cos \gamma}{\cos[\arctg(\operatorname{tg} \gamma \cos \varphi_n)]} \right\}$ – кут зустрічі долота з площиною пласта

геологічної структури; γ – кут падіння пластів; φ_n – напрям свердловини відносно підняття

пластів; $\sigma = \arcsin \left(\frac{\sin \gamma \sin \varphi_n}{\cos \omega} \right)$ – кут між апсидальною площиною і площиною дії

відхиляючого фактора анізотропії.

Провівши ці розрахунки, отримуємо уточнені значення ексцентриситету та інтенсивності викривлення свердловини, а отже, і зенітного кута. При стартовому розрахунку КНБК допускаємо, що величина ексцентриситету ε рівна 0. Для розрахунку наступного інтервалу використовуємо значення останнього циклу розрахунку, що дозволяє провести поінтервальне моделювання процесу поглиблення свердловини і відстежити зміну основних параметрів (при виборі відповідної середньої механічної швидкості буріння в певних породах, отриманої шляхом аналізу промислових даних, використовуючи кількість обертів бурильної колони за певний період).

Висновки

1. Запропоновано нову методику розрахунку КНБК в процесі буріння, яка враховує співвідношення технічних і геологічних факторів, що діють на породоруйнівні інструменти і спричиняють ексцентричне зміщення розширювача відносно пілотного стовбура.

2. Створено нову методику для визначення розподілу осьового навантаження між долотом і розширювачем у процесі поглиблення свердловини, а також визначено вплив основних факторів, від яких залежить частка навантаження, що припадає на кожен з породоруйнівних інструментів.

I.V. Voyevidko, V.V. Tokaruk

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

DESIGN OF BOTTOM HOLE ASSEMBLES WITH TWO ROCK CUTTING TOOLS WITH PDC CUTTERS

Calculation methods for designing bottom hole assemblies (BHA) with two rock cutting elements with PDC cutters for drilling wells of large diameter with the ability to control trajectory of well are developed.

The mathematical model for calculating BHA wells of large diameter using two rock cutting elements – bit and hole opener, is developed. Basic technical and geological factors affecting the BHA elements (stress-stain state of BHA, lateral forces arising from the impact of geology) are modeled. An algorithm for determining the

weight distribution between the bit and the hole opener is designed. The formation of eccentric displacement of hole opener relative pilot hole and change of curving intensity in drilling is simulated.

Basic steps of the calculation cycle are shown, practical calculation using developed method is performed resulting in interval determining the following parameters – the weight on bit and hole opener, lateral forces on the rock cutting elements, eccentric displacement of hole opener, curving intensity of well.

Scientific novelty of proposed method consists in integrated approach to the calculation of configurations with two rock cutting elements that allows for iterative cyclical calculation of constant refinement of the basic parameters and the creation of data array to design the well trajectory.

The method of calculating BHA with two rock cutting elements allows to determine the rational design of BHA for directional drilling by changing the design parameters of drill collar, centralizing and supporting element (CSE), bit, hole opener and eccentricity limiter.

Key words: *well of large diameter, two rock cutting elements, hole opener, directional drilling, pilot hole, eccentricity.*

И.В. Воевидко, В.В. Токарук

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПОНОВОК НИЗА БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ С ДВУМЯ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩИМИ ИНСТРУМЕНТАМИ СО СВЕРХТВЕРДЫМ ВООРУЖЕНИЕМ

Разработана методика расчета компоновок низа бурильной колонны (КНБК) с двумя породоразрушающими инструментами, оснащенными твердосплавными резцами для бурения скважин большого диаметра с возможностью управления траекторией.

Разработана математическая модель расчета компоновок для бурения скважин большого диаметра с использованием двух породоразрушающих инструментов – долота и расширителя. Смоделированы основные технические и геологические факторы, влияющие на элементы компоновки (напряженно-деформированное состояние КНБК, отклоняющие силы, возникающие из-за влияния породы). Создан алгоритм для определения распределения осевой нагрузки между долотом и расширителем. Смоделировано формирование эксцентричного смещения расширителя относительно пилотного ствола и изменение интенсивности искривления ствола в процессе углубления.

Приведены основные этапы расчета, проведен практический расчет согласно разработанной методике, результатом которого является поинтервальное определение следующих параметров – осевой нагрузки на долото и расширители, отклоняющих сил на породоразрушающих инструментах, эксцентричного смещения расширителя, интенсивности искривления ствола скважины.

Научная новизна предложенного в работе метода – комплексный подход к расчету компоновок с двумя породоразрушающими инструментами, который позволяет проводить итерационный циклический расчет с постоянным уточнением основных параметров и созданием массива данных для построения траектории скважины.

Разработанная методика расчета компоновок низа бурильной колонны с двумя породоразрушающими инструментами позволяет определить рациональную конструкцию КНБК для бурения скважины в заданном направлении за счет изменения конструктивных параметров ОБТ, опорноцентрирующих элементов, долота, расширителя и ограничителя эксцентриситета.

Ключевые слова: *скважина большого диаметра, два породоразрушающих инструмента, расширитель, бурение в заданном направлении, пилотный ствол, эксцентриситет.*

Література

1. Haitham Al-Mayyam. New Concentric Dual Diameter Fixed Cutter Technology Bit Drills 56 Faster and Saves Operator Drilling Time in Directional Application Through Challenging Abrasive Sandstone in One of the Largest Reservoirs in the Middle East. SPE. SPE-183381-MS. This paper was prepared for presentation at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference held in Abu Dhabi, UAE, 7-10 November 2016. – 13p.

2. В. Meyer-Heye, H. Reckmann. Weight Distribution in Reaming While Drilling BHAs. This paper was prepared for presentation at the IADC/SPE Conference and Exhibition held in New Orleans, Louisiana, USA, 2-4 February 2010.
3. Воєвідко І.В. Розробка науково-методичних основ та технічних засобів для підвищення точності проведення нафтогазових свердловин в заданому напрямі: дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.10. – Івано-Франківськ, 2007. – 353с.
4. Райхерт Л.А., Фрыз И.М. Направленное бурение скважин в анизотропных породах роторным способом ступенчатыми КНБК. Вып. 61. – М.: Труды ВНИИБТ, 1985.
5. Григулецький В.Г. Оптимальное управление при бурении скважин. М.: Недра, 1988. – 229с.
6. Шрейнер Л.А. Физические основы механики горных пород. М.: Гостоптехиздат, 1950. – 211с.
7. Янтурын Р.А. Совершенствование методов расчетов параметров компоновок низа бурильной короны и их элементов для безориентированного бурения: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13. – Уфа, 2005. – 183 с.
8. Буримов Ю.Г. Копылов А.С., Орлов А.В. Бурение верхних интервалов глубоких скважин большого диаметра. – М.: Недра, 1975. – 231с.

Надійшла 10.06.20

References

1. Al-Mayyam, H. (2016). New concentric dual diameter fixed cutter technology bit drills faster and saves operator drilling time in directional application through challenging abrasive sandstone in one of the largest reservoirs in the middle east. Proceedings from International Petroleum Exhibition & Conference '16: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition (26–28 Sep 2016)*. (p.13). Abu Dhabi, UAE: SPE, Dubai World Trade Centre.
2. Meyer-Heye, B. & Reckmann, H. (2010). Weight distribution in reaming while drilling BHAs. Proceedings from *IADC/SPE Conference and Exhibition (2–4 February 2010)*. New Orleans: IADC/SPE.
3. Voyevidko, I. (2007). Rozrobka naukovo-metodychnykh osnov ta tekhnichnykh zasobiv dlya pidvyshchennya tochnosti provedennya naftohazovykh sverdlovyh v zadanomu napryami [Development of scientific and methodological bases and technical means for improving the accuracy of oil and gas wells in a given direction]. *Doctor's thesis*. Ivano-Frankovsk [in Ukrainian].
4. Raykhert, L. & Fryz, I. (1985). Napravlenoe burenie skvazhin v anizotropnykh porodakh rotornym sposobom stupenchatymi KNBK [Rotary directional drilling in anisotropic formations with step BHA]. *Trudy VNIIBT – Proceedings of the All-Union Scientific Research Institute of Drilling Technology, 61* [in Russian].
5. Hrihuletskii, V. (1988). *Optimalnoe upravlenie pri burenii skvazhin [Optimal control when drilling wells]*. Moskwa: Nedra [in Russian].
6. Shreyner, L. (1950). *Fizicheskie osnovy mekhaniki gornykh porod [Physical foundations of rock mechanics]*. Moskwa: Hostoptekhizdat [in Russian].
7. Yanturyrn, R. (2005). Sovershenstvovanie metodov raschetov parametrov komponovok niza burilnoi kolonny i ikh elementov dlia bezoryentirovannoho bureniia [Improvement of methods for calculating the parameters of the bottom drill bit assemblies and their elements for directionless drilling]. *Candidate's thesis*. Ufa [in Russian].
8. Burimov, J., Kopylov, A., & Orlov, A. (1975). *Burenie Verchnich Intervalov Glubokich Skvazhin Bolshogo Diametra [Drilling the upper intervals of deep wells of large diameter]*. Moskwa: Nedra [in Russian].